



冷水机组可再制造性 综合评价研究^{*}

天津大学 薛怀坤[☆] 由世俊 张欢 王亚楠 张琪

摘要 基于再制造产业的特点和流程,采用定性和定量相结合的方法建立了一种基于专家经验知识的冷水机组可再制造性综合评价模型,从回收性、技术性、经济性、资源环境性和风险性 5 个方面进行了分析,以某离心式冷水机组为例计算出冷水机组可再制造性综合评价指标,为冷水机组的回收利用提供借鉴和参考。

关键词 冷水机组 再制造 综合评价模型 回收性 技术性 经济性 资源环境性 风险性

Study on comprehensive evaluation of chiller remanufacturing

By Xue Huaikun[★], You Shijun, Zhang Huan, Wang Yanan and Zhang Qi

Abstract According to the characteristics and process of remanufacturing, using the qualitative and quantitative analysis methods, establishes a comprehensive evaluation model of chiller remanufacturing based on experts' experience by taking the recyclability, technology feasibility, economic feasibility, environmental benefit and risk as evaluation indexes. Taking a centrifugal chiller as an example, calculates its re-manufacturability index, providing reference for the recovery of chillers.

Keywords chiller, remanufacturing, comprehensive evaluation model, recyclability, technology feasibility, economic feasibility, environmental benefit, risk

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

0 引言

随着冷水机组市场规模的不断扩大,大量超期服役的机组面临着被淘汰的命运,极大地加重了资源和环境负荷。作为循环经济模式的一种,再制造对节约资源、能源和保护环境起着积极作用^[1]。冷水机组的再制造应该成为将来的发展趋势^[2]。

美国波士顿大学教授 Lund 在 Argonne 国家实验室的资助下,深入调查了美国的再制造行业并撰写了研究报告《再制造业:潜在的巨人》,调查结果表明,在美国经济中再制造业已占有重要地位^[3]。德国对再制造行业进行了相关法律及政策上的规定,制定了专门的法律对汽车的报废进行管理。

我国于 20 世纪 90 年代开始开展再制造基础理论研究。2007 年,国家发展改革委员会选择了 14 家企业作为再制造试点。从 2009 年 1 月起开始施行的《循环经济促进法》明确指出国家支持相关企业开展产品再制造工作^[4]。

再制造工程在国内外蓬勃发展,但是在冷水机组方面的应用较少。因此,探索再制造工程在冷水机组中的应用具有重要意义。

1 再制造工程

1.1 再制造定义

国家标准计划项目“机械产品再制造 通用技术要求”(项目编号:2009129-T-469)对再制造进行了定义:对旧产品进行专业化修复或升级改造,使其质量特性达到或优于原有新品水平的制造过程^[5]。再制造工程是以废旧零件为制造加工“毛坯”,采用先进的表面工程处理技术,借助先进的机械设备,使拆解零件的尺寸及形状得到恢复,使用性能得到提升。

①[☆] 薛怀坤,男,1989 年 9 月生,在读硕士研究生
300072 天津市南开区卫津路 92 号天津大学环境学院 24 楼
B503 室
(0) 13821596010
E-mail: xuehuaikun@126.com
收稿日期:2014-01-17
修回日期:2014-02-17

1.2 再制造流程

国家标准计划项目“机械产品再制造 通用技术要求”(项目编号:2009129-T-469)给出了再制造流程,如图1所示。

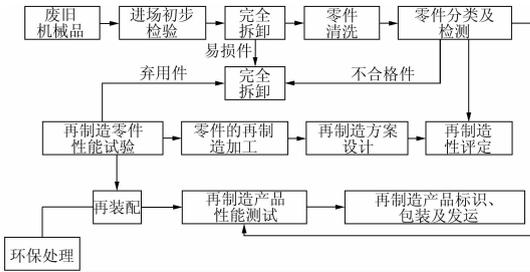


图1 再制造流程

2 冷水机组可再制造性综合评价指标体系的建立

在再制造案例分析和对冷水机组厂商、冷水机组回收企业、再制造研究部门调研的基础上,从回收性、技术性、经济性、资源环境性和风险性5个方面建立冷水机组可再制造性综合评价指标体系,如图2所示。

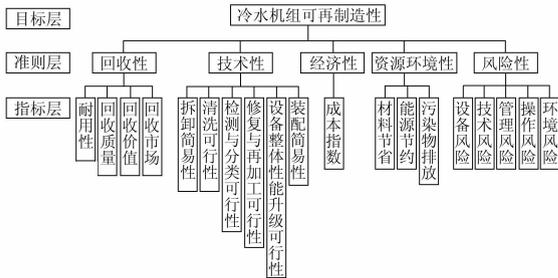


图2 冷水机组可再制造性综合评价指标体系

2.1 回收性评价指标及其量化

考虑到再制造过程是废旧产品回收经过再制造到新产品出厂的过程,因此废旧冷水机组的回收性对冷水机组再制造的可行性影响较大。

2.1.1 耐用性

耐用性是指产品在正常使用条件下,寿命结束前完成规定功能的能力。

$$R_{11} = \begin{cases} 1 & t_s \geq 10 \text{ a} \\ \frac{t_s - 3}{7} & 3 \text{ a} < t_s < 10 \text{ a} \\ 0 & t_s \leq 3 \text{ a} \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_{11} 为耐用性指标; t_s 为设计寿命, a, 为计算方便,当设计寿命大于等于 10 a 时,认为产品耐用度为 1,当设计寿命小于等于 3 a 时,一般来说可认为产品不是耐用产品,不必进行再制造。

2.1.2 回收质量

回收质量是指采用功能性报废率对回收质量指标进行量化。

$$R_{12} = 1 - \frac{N_g}{N_z} \quad (2)$$

式中 R_{12} 为回收质量指标; N_g 为关键零件耗损形报废(指因老化、腐蚀和疲劳等原因导致的报废)数,个; N_z 为关键零件总数,个。

2.1.3 回收价值

回收价值用来确定报废机组中关键零件可回收的价值。

$$R_{13} = 1 - \frac{C_y}{2C_x} \quad (3)$$

式中 R_{13} 为回收价值指标; C_y 为机组原价,万元; C_x 为报废机组现估价,万元,参照机械再制造相关资料,现估价乘以 2 表示残余价值达到原产品一半以上时才有回收价值。

2.1.4 回收市场

回收市场反映了回收机组的市场情况。

$$R_{14} = \frac{N_{hs}}{N_{qhs}} \quad (4)$$

式中 R_{14} 为回收市场指标; N_{hs} 为报废机组可回收数,台/a; N_{qhs} 为报废机组潜在回收数,台/a。

2.2 技术性评价指标及其量化

设备再制造过程包括产品拆卸、零件分类、零件清洗、零件的寿命评估和无损鉴定、再制造加工或者更换新件、设备重新装配、质量检测 and 性能考核等步骤。根据冷水机组再制造过程中各工艺的特点,建立六部分技术指标。

2.2.1 拆卸简易性

作为再制造过程的第一步,拆卸是废旧冷水机组及其零件进行再制造的基础^[6]。拆卸过程中应尽量减少对零件造成的损坏,同时应提高拆卸效率。拆卸时间的长短直接反映了机组的复杂程度,因此可以直接表示机组拆卸的简易性。

$$R_{21} = \frac{T_{lc} N_1}{T_{cd}} \quad (5)$$

式中 R_{21} 为拆卸简易性指标; T_{lc} 为单个零件的平均理想拆卸时间, h; N_1 为机组理想零件数, 个; T_{cd} 为实际拆卸总时间, h。

理想零件主要指满足下列特征之一的零件^[7]:

- 1) 需要大范围移动,小弹性位移不能满足要求;
- 2) 需要特定的材料以便达到设计要求;
- 3) 便于装配和拆卸;

4) 利用低附加值材料可以抵充使用造成的磨损。

2.2.2 清洗可行性

清洗就是去除零件表面不利于再制造的残留物。基于调研资料,常用的清洗方法有吹、刷、擦、烘焙、洗、化学洗涤剂喷洗、超声波清洗等几种^[8]。清洗难易系数规定如下:吹,0.9;刷、擦、烘焙和洗,0.7;化学洗涤剂喷洗,0.4;超声波清洗,0.2。根据采用不同清洗方式的零件所占的百分数乘以相应的清洗难易系数得到最终的清洗可行性指标 R_{22} 。

2.2.3 检测与分类可行性

零件性能检测的目的是检查零件的报废程度,经过检测,可将零件分为三类:

- 1) 不需加工而直接重用;
- 2) 经过再制造加工修复后重用;
- 3) 由于经济、技术的限制,不可重用。

冷水机组需要检测的情况主要集中在断裂、磨损和疲劳上,其中大部分零件可以通过肉眼判断将其分类,某些因疲劳失效的零件需要进行寿命检测。为简化计算,本文检测与分类可行性指标值由检测时间来确定。

$$R_{23} = \frac{N_t T_{\text{idt}}}{T_{\text{act}}} \quad (6)$$

式中 R_{23} 为检测与分类可行性指标; N_t 为需要检测的零件数,个; T_{idt} 为单个零件的平均理想检测时间,h; T_{act} 为实际检测总时间,h。

2.2.4 修复与再加工可行性

修复与再加工是将废旧设备质量和性能恢复到新品水平的关键环节。冷水机组的缺陷如腐蚀、摩擦磨损以及疲劳裂纹等都是从零件表面开始的^[9]。表面失效是缩短机组寿命、增加维修经费的基础性因素。

为简化计算,该指标主要由专家针对机组来判断。采用模糊综合评价法,将判断结构 u_i 分为很高,高,一般,低,很低 5 个等级,对应的指标值分别为 0.9,0.7,0.5,0.3,0.1。

聘请冷水机组销售商、制造商和再制造专家等 10 位专家根据评价等级评判修复与再加工可行性指标的等级,然后统计每项指标在每项评语下的专家赞同率,将其视为每项指标对评语集 V 的隶属度且满足

$$\sum_{k=1}^5 r_k = 1 \quad (7)$$

式中 r_k 为修复与再加工可行性指标对第 k 个评

语的隶属度, $k=1,2,3,4,5$ 。

$$R_{24} = (r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4 \quad r_5) \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 R_{24} 为修复与再加工可行性指标。

2.2.5 设备整体性能升级可行性

随着表面工程技术的发展,可以通过各类高科技技术实现冷水机组功能及性能的提升。但是,由于废旧冷水机组在结构、材料和功能等方面的限制,冷水机组本体结构较难改变,新功能的实现就受到了约束,这使得部分冷水机组可能并不适合升级改造。为简化计算,该指标主要由专家针对机组作出判断,参考修复与再加工可行性指标确定设备整体性能升级可行性指标 R_{25} 。

2.2.6 装配简易性

装配简易性是将零件再制造装配成新设备从而保证设备质量和性能的关键因素,并影响再制造的时间和成本。装配简易性指标与零件的连接结构、再装配零件的数量和路径等因素有关。由于再制造工艺过程的复杂性和不确定性,本文采用装配时间来简化和量化该指标。

$$R_{26} = \frac{N_l T_{\text{lz}}}{T_{\text{zd}}} \quad (9)$$

式中 R_{26} 为装配简易性指标; N_l 为机组理想零件数,个; T_{lz} 为单个零件的平均理想装配时间,h; T_{zd} 为实际装配总时间,h。

2.3 经济性评价指标及其量化

从经济性方面考虑废旧冷水机组是否适合再制造,主要是通过分析废旧冷水机组的再制造成本来判定设备再制造的经济可行性。废旧冷水机组再制造成本组成如表 1 所示,再制造成本用式(10)计算。

表 1 冷水机组再制造成本组成

原材料成本 C_1	替换零件
	回收冷水机组
辅料成本 C_2	清洗液
	润滑油
	其他
能耗成本 C_3	电费
	水费
	汽油费
人工成本 C_4	人工费
副产品冲减成本 C_5	回炉零件

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - C_5 \quad (10)$$

式中 C 为冷水机组再制造成本,万元/台。

$$d = \frac{C}{C_N} \quad (11)$$

式中 d 为折扣率; C_N 为同种性能或质量的新冷水机组的制造成本, 万元/台。

根据再制造商的实践经验总结得出:

$$R_3 = \begin{cases} 1 & d < 40\% \\ -2.5d + 2 & 40\% \leq d \leq 80\% \\ 0 & d > 80\% \end{cases} \quad (12)$$

式中 R_3 为经济性指标。

2.4 资源环境性指标及其量化

从全寿命周期的角度考虑, 分析比较冷水机组原始制造、再制造过程中所涉及的材料、资源利用以及污染物排放情况。

2.4.1 材料节省

再制造重新利用了大量废旧零件。废旧冷水机组再制造过程中, 使用的零件有 3 类: 经过简单清洗保养后可直接使用的零件; 经过再制造修复加工后可使用的零件; 报废不可使用而被替换的新品零件。用再制造冷水机组回收重用的材料的质量来表示材料节省。

$$M_r = \sum_{g=1}^L M_g \quad (g = 1, 2, \dots, L) \quad (13)$$

式中 M_r 为冷水机组再制造节省的材料的质量, kg; M_g 为第 g 个重用的零件的质量, kg; L 为回收重用的零件数量, 个。

$$R_{41} = \frac{M_r}{M_t} \quad (14)$$

式中 R_{41} 为材料节省指标; M_t 为原始制造冷水机组的总质量, kg。

2.4.2 能源节约

再制造重用了大量废旧零件, 减少了原材料的开采、制备和制造加工所消耗的能源。采用寿命周期清单法分析能源节约率。为简化计算, 以冷水机组再制造过程相对于原始制造过程的标准煤耗减少率来表示能源节约指标。

$$R_{42} = \frac{\sum_{g=1}^L E_g - E_r}{E_m} \quad (15)$$

式中 R_{42} 为能源节约指标; E_g 为回收利用的第 g 个零件中附加的能源(以标准煤计), kg; E_r 为再制造过程中的能源消耗(以标准煤计), kg; E_m 为原始制造冷水机组的能源消耗(以标准煤计), kg。

2.4.3 污染物减排

冷水机组再制造重新利用了大量废旧零件, 从而减少了零件原材料开采、加工过程中对环境造成的污染。显而易见, 冷水机组再制造更具有环境友好性。参考机组原始制造寿命周期清单数据, 原始制造冷水机组排放的污染物包括 CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , CH_4 , H_2S 等, 其中 CO_2 占排放污染物总量的 99% 左右。以冷水机组再制造过程相对于原始制造过程的 CO_2 减少率来简化污染物减排指标。

$$R_{43} = \frac{\sum_{g=1}^L E_{g\text{CO}_2} - E_{\text{CO}_2}}{E_{\text{mCO}_2}} \quad (16)$$

式中 R_{43} 为污染物减排指标; $E_{g\text{CO}_2}$ 为回收利用的第 g 个零件制造过程中的 CO_2 排放量, kg; E_{CO_2} 为再制造过程中的 CO_2 排放量, kg; E_{mCO_2} 为原始制造冷水机组的 CO_2 排放量, kg。

2.5 风险性评价指标及其量化

再制造冷水机组是一种新型产品, 从认识到接收并使用需要一个过程。在分析冷水机组的可再制造性时, 有必要对冷水机组再制造过程的风险进行评估。将冷水机组的再制造过程看作一个项目过程, 可利用项目管理中的风险评估法对其风险进行评估。冷水机组再制造作为一个新兴产业, 对其进行风险评估可参考的历史数据很少, 基于此, 笔者结合文献进行现场调研, 将再制造过程中可能出现的风险因子分为 5 类, 见表 2。

利用层次分析法确定各风险因子的权重, 用式 (17) 计算设备风险指标。

$$R_{51} = (f_{S1} \quad f_{S2} \quad f_{S3} \quad f_{S4} \quad f_{S5} \quad f_{S6} \quad f_{S7} \quad f_{S8}) \begin{pmatrix} u_{S1} \\ u_{S2} \\ u_{S3} \\ u_{S4} \\ u_{S5} \\ u_{S6} \\ u_{S7} \\ u_{S8} \end{pmatrix} \quad (17)$$

表 2 再制造过程风险因子统计

设备风险 R_{51}	手工拆卸的破坏性及效率低下 R_{S1}
	不具备清洗设备导致清洗质量差及效率低 R_{S2}
	传统检测手段的落后导致质量检测准确率低 R_{S3}
	表面预处理设备不符合产品要求 R_{S4}
	没有根据产品特点选择专用加工设备 R_{S5}
	不具备有针对性的表面涂层性能测量设备 R_{S6}
	产品缺少与原型新品的匹配验证过程 R_{S7}
	加工设备的投资大及通用性不高 R_{S8}
	没有掌握产品结构导致的拆解技术或顺序错误 R_{J1}
技术风险 R_{52}	清洗技术及材料错误导致清洗不干净 R_{J2}
	检测技术不完善导致产品剩余寿命评估失真 R_{J3}
	不具备合格的表面预处理技术导致表面涂层脱落 R_{J4}
	加工技术及材料选择的盲目性影响涂层性能 R_{J5}
	表面涂层性能检测技术不具备或不完善 R_{J6}
	后续加工达不到原产品精度要求 R_{J7}
管理风险 R_{53}	整机寿命预测难度大 R_{J8}
	核心技术的研发周期长及针对性强 R_{J9}
	废旧产品回收渠道不畅通 R_{G1}
	拆卸前没有对废旧产品的状态进行确认 R_{G2}
	清洗设备及材料选择错误 R_{G3}
	不可利用件流入后续加工过程 R_{G4}
	对拆卸后零件的检测频次不够 R_{G5}
	内部损伤件没有作出标示 R_{G6}
	用于产品的新件没有进行检测而直接装配 R_{G7}
操作风险 R_{54}	废旧产品损坏状态不一致导致生产计划制定困难 R_{G8}
	不掌握市场需求导致产品不足或剩余 R_{G9}
	未按规定的顺序和工具进行拆解而导致损坏 R_{C1}
	检测过程不规范致使缺陷没有被检出 R_{C2}
	预处理前确定的修理等级不够 R_{C3}
	加工过程的不规范导致返工、返修或报废 R_{C4}
环境风险 R_{55}	未按要求装配顺序及设备进行装配 R_{C5}
	未按原型品要求试机致产品质量不达标 R_{C6}
	拆卸后的报废品随意丢弃 R_{H1}
	大量采用化学清洗技术 R_{H2}
	没有对生产过程中产生的废物进行处理 R_{H3}
	没有对加工过程中的噪声污染进行隔绝处理 R_{H4}

式中 R_{5i} 为设备风险指标; f_{Si} 为设备风险因子 i 的权重, $i=1, 2, \dots, 8$; u_{Si} 为设备风险因子 i 的预测值, 存在该风险 $u_{Si}=1$, 不存在该风险 $u_{Si}=0$ 。

同理, 技术、管理、操作和环境风险指标也通过风险因子权重和预测结果得出。

3 指标权重的分析与确定

3.1 结构熵权法

通过分析系统指标及其相互关系, 并分解为若干个独立的层次结构, 将采集专家意见的德尔菲专家调查法与模糊分析法相结合, 对指标的重要性进行“典型排序”, 用熵理论对“典型排序”结构的不确定性进行定量分析, 计算熵值和进行“盲目度”分析, 对可能产生的潜在的偏差数据进行统计处理, 得出同一层次各指标的相对重要性顺序, 确定出每一层次同类指标的重要程度数值, 即指标的权重^[10]。

3.2 各级指标权重的确定

按照德尔菲专家调查法的要求, 根据指标体系, 选择再制造专家、设备专家、机组厂家、销售商、维修人员等作为调查对象, 发放调查问卷。通过 3 次沟通反馈, 专家对冷水机组再制造有了比较深入的理解并能够给出基于其知识体系的较为公正客观的回答。根据结构熵权法得出各级指标的权重值, 见表 3、4。

4 冷水机组可再制造性综合评价指标确定

冷水机组可再制造性综合评价指标 R 用下式计算:

表 3 冷水机组可再制造性评价一级指标权重

	回收性	技术性	经济性	资源环境性	风险性
专家 1	(2, 1, 1)	(1, 1, 1)	(3, 2, 2)	(1, 2, 2)	(2, 3, 3)
专家 2	(3, 3, 3)	(2, 1, 1)	(1, 2, 2)	(4, 4, 4)	(3, 5, 5)
专家 3	(1, 2, 2)	(3, 3, 3)	(1, 1, 1)	(5, 5, 5)	(4, 4, 4)
专家 4	(5, 3, 3)	(1, 2, 2)	(1, 1, 1)	(5, 5, 5)	(1, 4, 4)
专家 5	(3, 2, 2)	(2, 3, 3)	(1, 1, 1)	(5, 5, 5)	(4, 3, 3)
平均认识度 B_j	-0.834 690	-0.897 430	-0.957 780	-0.541 170	-0.681 290
认知盲目度 Q_j	0.036 407	0.010 581	0.029 413	0.118 334	0.043 530
总体认识度 X_j	-0.804 300	-0.887 940	-0.929 610	-0.477 130	-0.651 630
权重	0.214 445	0.236 745	0.247 855	0.127 215	0.173 741

注: 表中括号内的 3 个数据为 3 次反馈评分。

$$R = (R_1 \quad R_2 \quad R_3 \quad R_4 \quad R_5) \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中 R 为冷水机组可再制造性指标; R_1, ω_1 分别为回收性指标及其权重; R_2, ω_2 分别为技术性指标

及其权重; R_3, ω_3 分别为经济性指标及其权重; R_4, ω_4 分别为资源环境性指标及其权重; R_5, ω_5 分别为风险性指标及其权重。

选用 5 个等级定性地描述冷水机组的可再制造性, 将可再制造性指标分成 5 个等级来评价可再制造性。参考其他领域产品的再制造指标, 定义如下:

表4 冷水机组可再制造性评价各级指标权重

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	总权重
回收性	0.214 445	R_{11}	0.172 135	0.036 913
		R_{12}	0.266 912	0.057 238
		R_{13}	0.266 588	0.057 168
		R_{14}	0.294 364	0.063 125
		R_{21}	0.175 275	0.041 495
技术性	0.236 745	R_{22}	0.122 180	0.028 926
		R_{23}	0.165 637	0.039 214
		R_{24}	0.203 803	0.048 249
		R_{25}	0.155 942	0.036 919
		R_{26}	0.177 163	0.041 942
		R_{31}	1	0.247 855
经济性	0.247 855			
资源环境性	0.127 215	R_{41}	0.385 037	0.048 983
		R_{42}	0.322 716	0.041 054
		R_{43}	0.292 247	0.037 178
		R_{51}	0.228 031	0.039 618
		R_{52}	0.254 379	0.044 196
风险性	0.173 741	R_{53}	0.191 022	0.033 188
		R_{54}	0.195 360	0.033 942
		R_{55}	0.131 208	0.022 796

$$\text{可再制造性} = \begin{cases} \text{很高} & 0.8 < R \leq 1 \\ \text{高} & 0.6 < R \leq 0.8 \\ \text{一般} & 0.4 < R \leq 0.6 \\ \text{低} & 0.2 < R \leq 0.4 \\ \text{很低} & 0 \leq R \leq 0.2 \end{cases} \quad (19)$$

5 实例分析

某水冷离心式冷水机组,压缩机为密闭式离心压缩机,机壳由齿轮箱体和传动壳体组成。叶轮和进口可调导叶装置安装在进口,增速齿轮安装在传动壳体中。油过滤器、油冷却器为外置式。机组的油箱和机壳共为一体。叶轮采用特殊铝合金材料制成。蒸发器为卧式满液式换热器,管束在长度方向上由支撑板支撑。冷凝器为卧式壳管式换热器,冷凝器内沿轴向装有缓冲板。

该机组运行 12 a,期间大修过一次,属功能型报废。经计算,再制造冷水机组的成本仅为新品的 36%,经济效益良好。再制造冷水机组材料重用率为 80%,标准煤节约率为 80%,CO₂ 减排率为

76%,资源环境改善明显。经计算回收性指标为 0.601 377,技术性指标为 0.471 06,经济性指标为 1,资源环境性指标为 0.796 526,风险性指标为 0.546 901,可再制造性综合评价指标为 0.684 68,可再制造性高。

6 结语

冷水机组再制造是集回收、拆解、分类储存、包装运输、再制造加工、销售等于一体的生产业务,基于再制造流程和冷水机组特点,本文采用定性和定量相结合的方法,建立了一种基于专家经验知识的废旧冷水机组可再制造性综合评价模型,从回收性、技术性、经济性、资源环境性和风险性 5 个方面展开构建二级指标对冷水机组的可再制造性进行了评价。

参考文献:

- [1] 徐滨士,张伟,马世宁,等.面向 21 世纪的绿色再制造[J].中国表面工程,1999,45(4):1-4
- [2] 王亚楠.冷水机组可再制造性综合评价研究[D].天津:天津大学,2013
- [3] Lund R T. Remanufacturing: the experience of the USA and implications for developing countries[M]. Washington: World Bank,1984
- [4] 刘渤海.再制造产业发展过程中的若干运营管理问题研究[D].合肥:合肥工业大学,2012
- [5] 全国绿色制造技术标准化技术委员会. GB/T 28619—2012 再制造 术语[S].北京:中国标准出版社,2012
- [6] 杜彦斌.面向生命周期的机床再制造与综合提升方案设计研究及应用[D].重庆:重庆大学,2009
- [7] 毛果平,朱有为,吴超.废旧机电产品再制造性评估模型研究[J].现代制造工程,2009(6):114-118
- [8] 张国庆,荆学东,浦耿强,等.汽车发动机可再制造性评价[J].中国机械工程,2005,16(8):739-742
- [9] 王广起.再制造物流与逆向物流研究[J].市场,2008(6):24-26
- [10] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J].系统工程理论与实践,2010(7):1225-1228